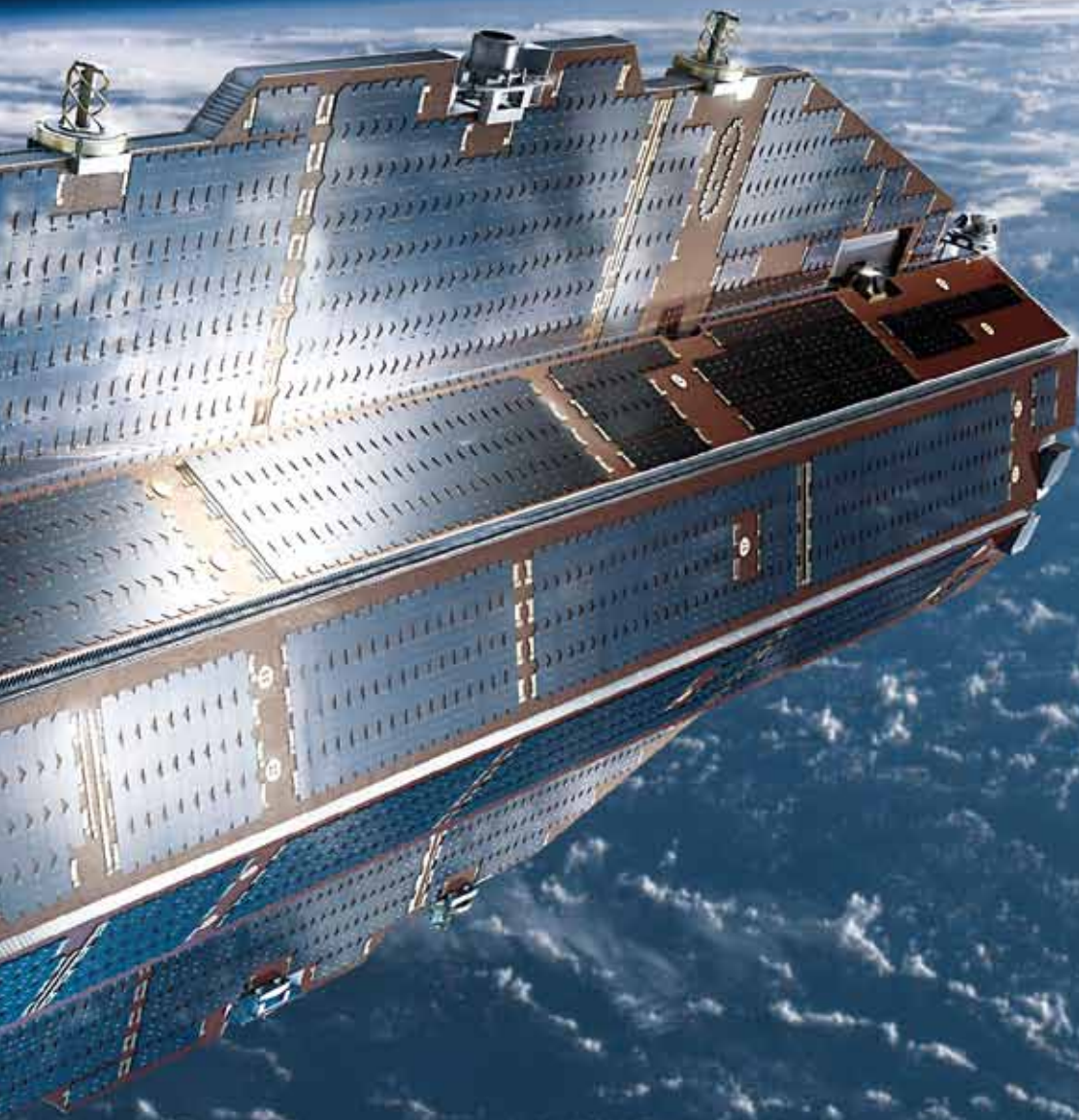


GOCE umkreist in 90 Minuten die Erde, und seine Bahn überstreicht innerhalb von zwei Monaten den gesamten Globus. So kann der Satellit lückenlos vom Weltraum aus die Gravitation vermessen

Link

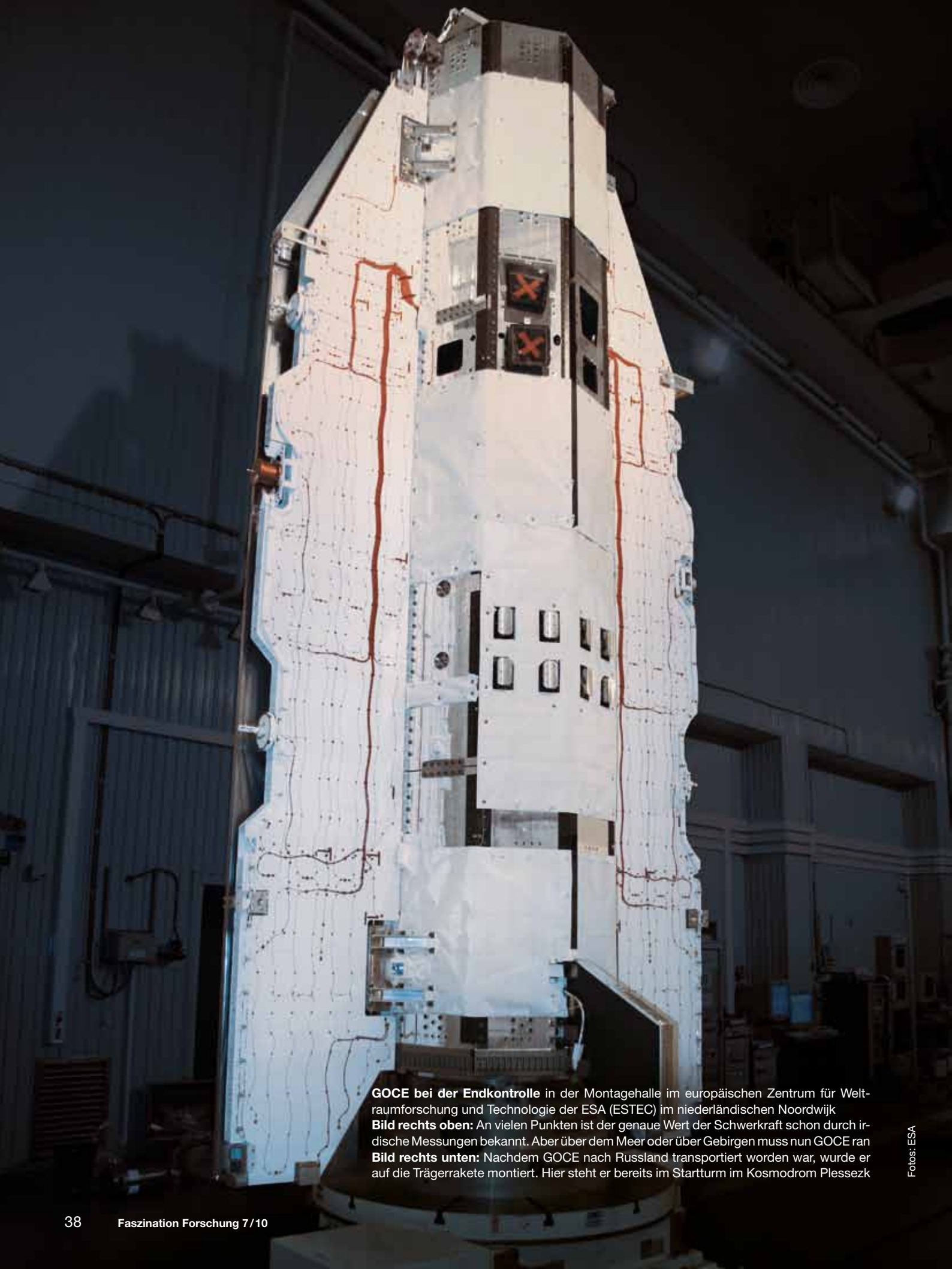
www.goce-projektbuero.de





Wie man ins Innere der Erde schaut

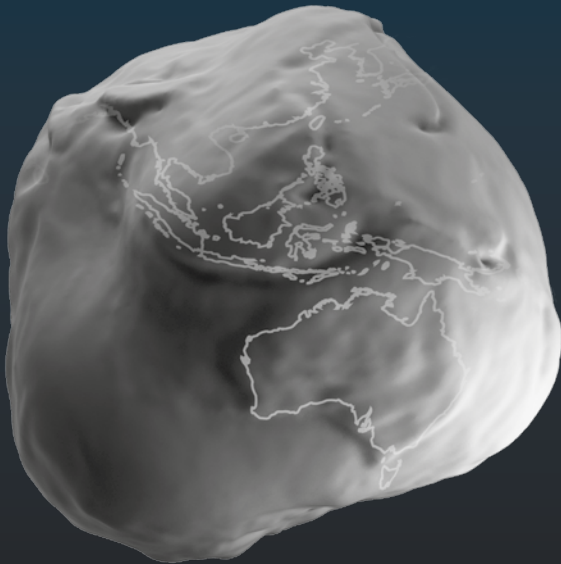
Unser Globus ist nicht so regelmäßig, wie er von der Ferne aussieht. In seinem Inneren wirken Kräfte, die sein Schwerfeld verbeulen, mit weitreichenden Folgen. Um dessen Form endlich exakt zu bestimmen, vermessen es europäische Forscher mit dem Satelliten GOCE nun mit nie gekannter Genauigkeit. Prof. Reiner Rummel von der TUM ist einer der Väter dieser ESA-Mission



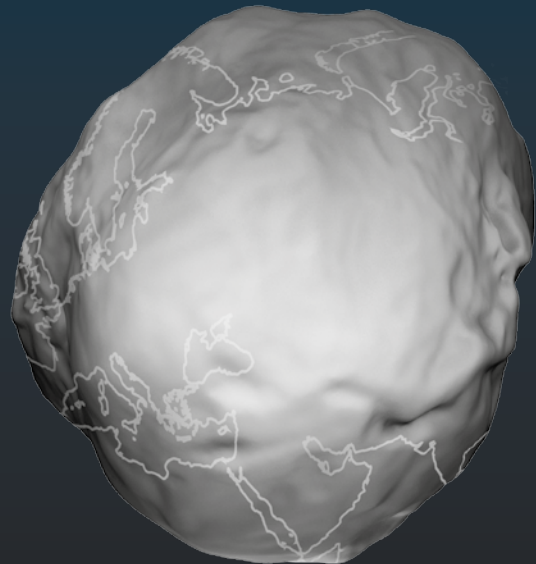
GOCE bei der Endkontrolle in der Montagehalle im europäischen Zentrum für Welt-
raumforschung und Technologie der ESA (ESTEC) im niederländischen Noordwijk
Bild rechts oben: An vielen Punkten ist der genaue Wert der Schwerkraft schon durch ir-
dische Messungen bekannt. Aber über dem Meer oder über Gebirgen muss nun GOCE ran
Bild rechts unten: Nachdem GOCE nach Russland transportiert worden war, wurde er
auf die Trägerrakete montiert. Hier steht er bereits im Startturm im Kosmodrom Plessezk

Fotos: ESA

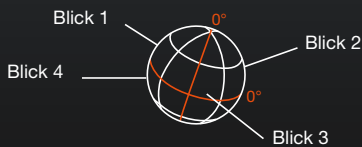




1



2



Das Geoid ist eine dem mittleren Meeresspiegel entsprechende Äquipotentialfläche der Schwerkraft der Erde und weicht um bis zu 100 Meter von einem regelmäßigen Rotationsellipsoid ab. Hier sind die Abweichungen stark überhöht gezeigt, und so wirkt es wie eine Kartoffel

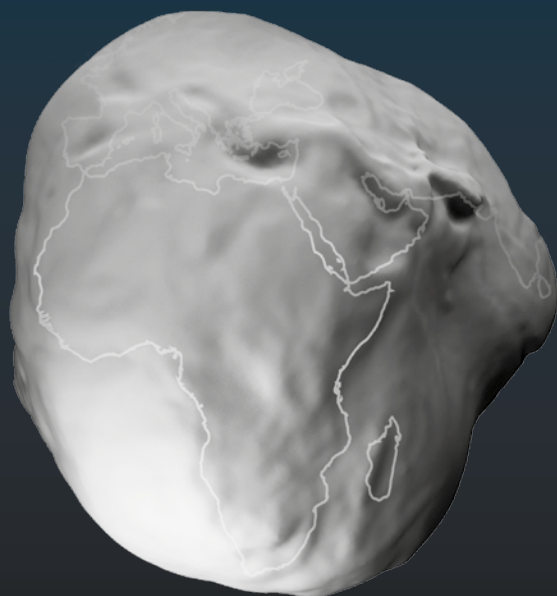
Es ist ein seltsames Missverhältnis: Während Google unsere Erde heute schon bis in den letzten Vorgarten hinein abbildet, weiß die Wissenschaft noch nicht einmal genau, wie hoch nun wirklich die Meereshöhe ist. Deutschland richtet sich dabei nach dem Meeresspiegel in Amsterdam, Frankreich nach dem in Marseille, Österreich nach dem in Triest. Und als man Anfang der neunziger Jahre den Tunnel unter dem Ärmelkanal baute und damit endlich eine Basis für Vergleichsmessungen zwischen Großbritannien und dem Kontinent schuf, stellten Geodäten mit Schrecken fest, dass die angenommene Meereshöhe zwischen den beiden Seiten um rund einen halben Meter differierte.

Mit solchen Fehlern wird es nun bald ein Ende haben. Denn seit dem 17. März 2009 umkreist GOCE, ein Satellit der Europäischen Weltraumbehörde ESA, die Erde und vermisst deren Schwerefeld mit noch nie dagewesener Genauigkeit. Seine Messungen sind untrennbar verbunden mit der Ermittlung der Erdfigur, und so wird

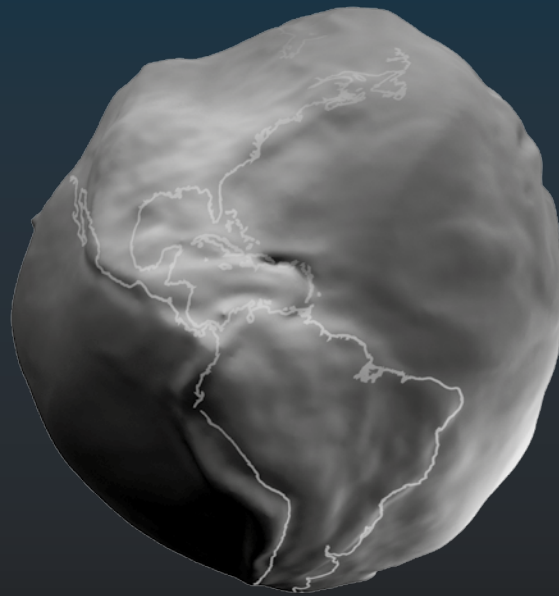
es auch bald möglich sein, die Meereshöhe überall auf ein bis zwei Zentimeter genau zu bestimmen, unabhängig von Hafenstädten oder Unterseetunneln.

Eine riesige Wasserwaage

GOCE steht für Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer, und in diesem Namen drücken sich bereits die beiden Hauptaufgaben des Satelliten aus: die Messung des Gravitationsfeldes der Erde und die Erkundung der Ozeanzirkulation. Beides hängt aufs Engste zusammen, und beides hat letztlich mit der Bestimmung des Geoids zu tun. Dieses Gebilde ist ein gedachter Körper, der die Oberfläche eines hypothetischen, die gesamte Erde vollständig bedeckenden Weltozeans darstellt. Dabei soll dieser in Ruhe sein, seine Form wäre ausschließlich durch die Schwerkraft festgelegt. „Es ist eine Fläche, die überall horizontal ist“, erklärt Prof. Reiner Rummel, Mitinitiator der GOCE-Mission und bis vor Kurzem Professor für Astronomische und Physikalische Geodäsie an der



3



4

Seit seinem Start am 17. März 2009 vermisst GOCE mit großer Genauigkeit dieses Geoid, das hier von vier Seiten gezeigt wird. Die Unterschiede in der Schwerkraft ergeben sich aus den Dichtestrukturen in Erdkruste und -mantel, aus großen Eismassen und Meeresströmungen

TUM. „Das Geoid ist praktisch eine erdumspannende Wasserwaage. Egal, wo Sie auf seine Oberfläche eine Wasserwaage legen, sie wird überall perfekt horizontal sein.“ Das heißt jedoch noch lange nicht, dass es sich um eine Kugel handelt, sondern es hat in Wirklichkeit eher die Form einer Kartoffel, oder wissenschaftlicher ausgedrückt: Es gleicht einem Rotationsellipsoid, dessen Oberfläche sich an manchen Stellen bis zu 100 Meter aufwölbt oder eindellt. In der Erdvermessung dient das Geoid als Bezugshorizont für die Topografie der Ozeane und Kontinente.

Dellen im Bauch der Erde

Die Abweichungen von der Form des Ellipsoids entstehen durch Massenunterschiede im Untergrund. „Idealerweise betrachtet man ja die Erde als Kugel mit einheitlicher Dichte“, erläutert Prof. Roland Pail, Rummels Lehrstuhl-Nachfolger, der sich intensiv bei der Auswertung der GOCE-Daten engagiert. „Wenn das so wäre, würde auch das Geoid eine Kugel sein, die erst durch

die Rotation an den Polen abgeplattet würde. Sobald man aber irgendwelche inhomogenen Massenverteilungen im Erdinneren hat, zeigt die Erde keine konstante Dichte mehr, und dementsprechend verändert sich auch die Schwerkraft und damit das Geoid.“ Der Bauch der Erde bekommt Dellen oder Buckel, je nachdem, was innen vor sich geht.

Die Form des Geoids soll GOCE also bestimmen. In der Praxis geschieht dies dadurch, dass der Satellit die Schwerkraft misst, die die Erde an jeder Stelle auf ihrer Oberfläche und im Weltraum ausübt. Für viele Punkte auf der Erdoberfläche ist der Wert schon bekannt, denn man kann ihn direkt mit Fallversuchen oder Federwaagen messen. Aber über dem Meer oder in unwegsamem Gelände, im Urwald oder in Wüsten war man bisher auf Schätzungen angewiesen. GOCE jedoch umkreist in 90 Minuten die Erde, und seine Bahn überstreicht innerhalb von zwei Monaten den gesamten Globus. So kann der Satellit lückenlos vom Weltraum aus die Gravitation vermessen. ▶



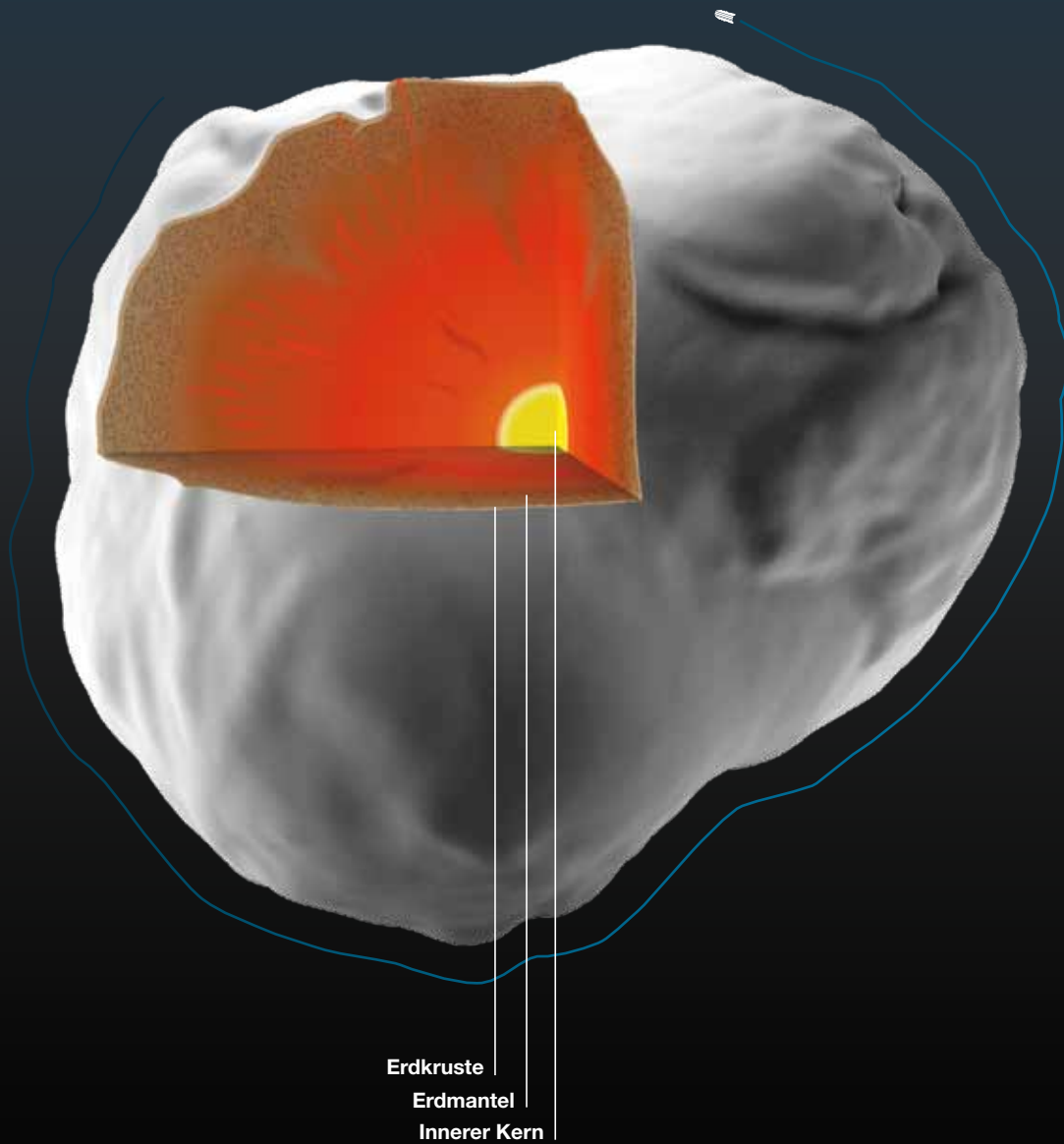
Geophysikern eröffnet GOCE einen Blick in den Bauch der Erde. Aus dem Gravitationsfeld ergeben sich wichtige Beiträge zum Verständnis von Gebirgsbildung, Plattentektonik, Vulkanismus bis hin zu Erkenntnissen über die Erdbebenentstehung

Grundsätzlich erscheint es beinahe paradox, das Schwerefeld der Erde vom Weltraum aus zu erfassen, denn die Signalstärke nimmt mit dem Quadrat des Abstands ab. Die Umlaufbahn des Satelliten sollte daher möglichst niedrig sein, damit man ein möglichst großes Signal messen kann.

Andererseits gilt aber auch: Je niedriger der Satellit fliegt, desto mehr Luftwiderstand wirkt auf ihn. Dies verursacht wiederum Störungen in seiner Bewegung, die nicht auf die Gravitation zurückzuführen sind und die man kompensieren muss. Als Kompromiss zwischen den beiden Effekten hat man für GOCE eine Umlaufbahn in etwa 255 Kilometer Höhe gewählt, was beträchtlich niedriger ist als die Umlaufbahn anderer Fernerkundungssatelliten. Die ganz allmähliche Abbremsung durch die Restatmosphäre in dieser Höhe wird durch ein Ionentriebwerk kompensiert, das kontinuierlich arbeitet. So sind Satellit und Messgeräte nur unter Einfluss der Gravitation.

Super-GPS zur Bahnberechnung

Bei der Ermittlung der Gravitationskraft spielen zwei Messsysteme zusammen: Einerseits bestimmt GOCE mithilfe von GPS-Signalen laufend seine Position, und zwar viel genauer, als dies Autofahrer auf der Erde tun. Aus diesen Messungen berechnet man die Umlaufbahn auf Zentimeter genau, die aufgrund der schwankenden Gravitation natürlich auch keine exakte Kreisbahn ist. Aus dieser unregelmäßigen Bahn wird auf die verursachende Gravitation zurückgeschlossen. Andererseits enthält der Satellit ein sogenanntes Gradiometer, das feinste Beschleunigungen messen kann. Es besteht aus drei Prüfmassenpaaren, die am Ende von drei zueinander senkrecht stehenden, ungefähr 50 Zentimeter langen Achsen positioniert sind. Auf jede Prüfmasse wirkt das Gravitationsfeld der Erde aufgrund ihrer unterschiedlichen Position im Schwerefeld etwas anders. Aus den Differenzen der Beschleunigungsmessungen kann man deshalb ein sehr detailliertes Abbild der räumlichen Variationen der Schwerkraft auf der ▶



Die Erde ist in ihrem Inneren nicht völlig homogen. Die Variationen in der Dichte des Materials sorgen dafür, dass das Geoid Dellen oder Buckel bekommt, je nachdem, was innen vor sich geht



Das Herz des Satelliten: Im oberen Teil befinden sich die drei Gradiometrie-Messgeräte, darunter die Computer

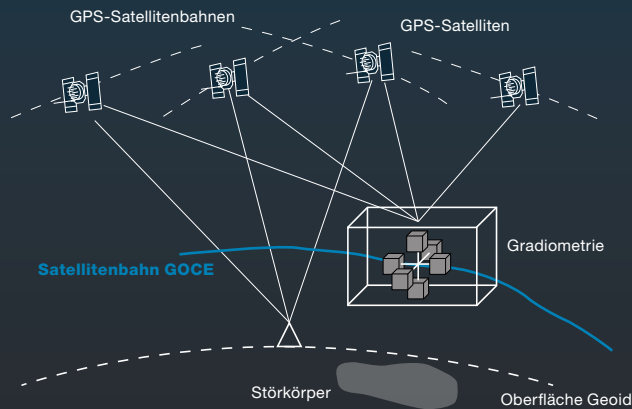
Erde berechnen. „Die Unterschiede in der Anziehung sind natürlich extrem klein“, betont Reiner Rummel. „Es ist eine Kunst, sie zu messen, denn es handelt sich nur um ein Millionstel der Erdanziehung, und diesen Wert können wir wiederum auf ein Millionstel genau messen.“

Überhaupt ist man beim Bau von GOCE an die Grenzen des technisch Machbaren gegangen, um höchste Präzision zu erzielen. Das Gradiometer wird beispielsweise auf ein zehntausendstel Grad temperaturstabil gehalten; extrem feste Kohlefaserstrukturen sorgen dafür, dass der Satellit sich nicht verformt. Solarzellen erzeugen die nötige Energie für den Betrieb, und vielfältige Positionierungs- und Peilgeräte halten den Satelliten auf Kurs. Wegen der irdischen Schwerkraft konnte man nicht alles auf der Erde erproben, auch wenn man einzelne Teile des Satelliten beispielsweise im Bremer Fallturm für einige Sekunden in Schwerelosigkeit getestet hat. „GOCE ist ein Prototyp“, betont Rummel, „der wird raufgeschickt, und alles muss auf Anhieb laufen. Dass

die Messsysteme, die wirklich heikel sind, alle funktionieren, finde ich grandios. Das ist eine fantastische Ingenieurleistung und ein echter Erfolg.“

Der Prototyp brachte allerdings auch unliebsame Überraschungen. So fiel schon im Februar 2010 wegen eines Chip-Problems der Hauptcomputer aus, und die Wissenschaftler mussten auf den Backup-Computer umschalten. Deshalb war das Entsetzen groß, als dieser am 8. Juli 2010 von einer Sekunde zur anderen schwieg und keine Daten mehr zur Bodenstation in Kiruna sendete. Zum Glück erhielt man wenigstens noch einige Telemetriedaten vom Satelliten, und so konnten sich die Spezialisten aus Industrie und Forschung langsam an das Problem herantasten. „Am Ende stellte sich heraus, dass der Computer offenbar zu kalt war“, sagt Rummel. „Als man seine Temperatur um sieben Grad erhöhte, begann er wieder zu arbeiten.“ Für den 64-jährigen Geodäten und seinen 38-jährigen Kollegen Roland Pail bedeutete dieses Missgeschick, dass ▶

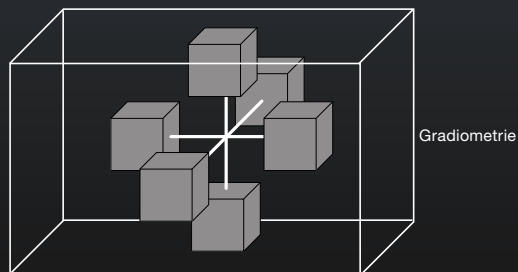
So funktioniert das Messsystem:



1

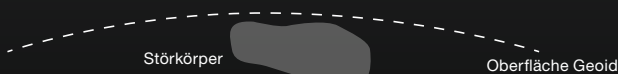
Die zwei Messkomponenten der GOCE-Mission:

Die unregelmäßige Massenverteilung in der Erde (symbolisiert durch den grauen Störkörper) führt zu einer unregelmäßigen Satellitenbahn. Diese wird mittels GPS gemessen. Aus den Bahnabweichungen zu einer idealen Kreisbahn kann man dann bereits auf das zugrunde liegende Schwerefeld schließen.



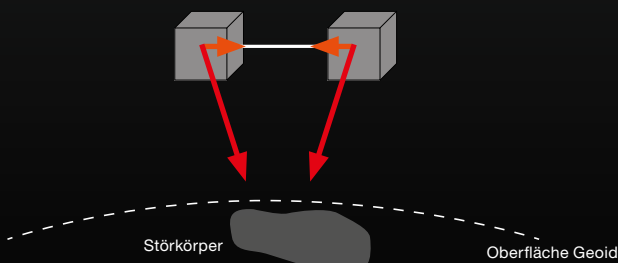
2

Noch weitaus feinere Abweichungen misst das Gradiometer-Messgerät in GOCE. Es besteht aus 6 Probmassen (als graue Würfel dargestellt), die paarweise am Ende von drei zueinander senkrecht stehenden Achsen angeordnet sind. Auf diese wirkt die Schwerebeschleunigung aufgrund der Störkörper unterschiedlich. Daraus kann das Schwerefeld berechnet werden.



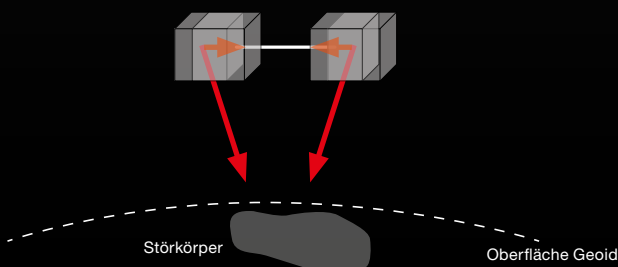
3

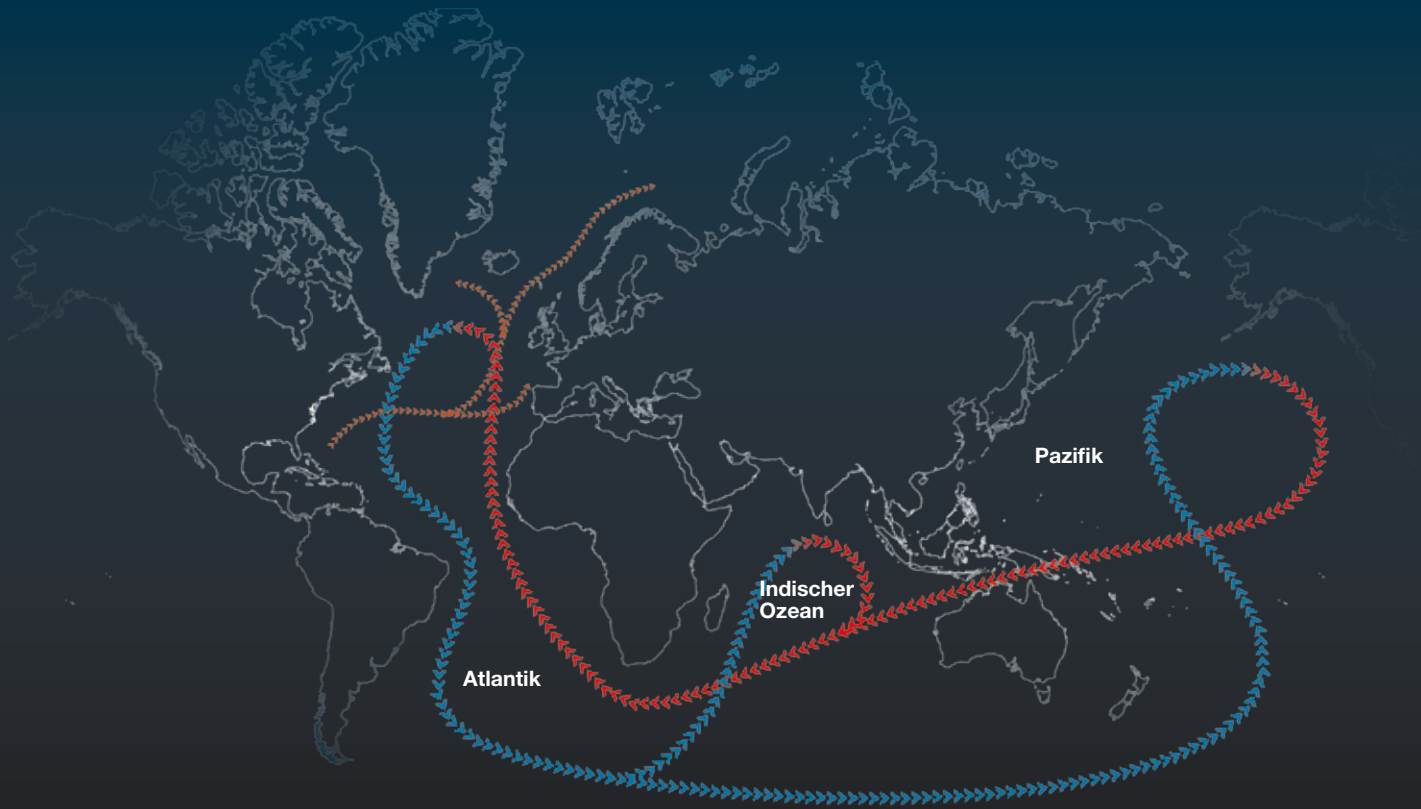
Zur Veranschaulichung wird der Effekt nur für eine Achse betrachtet. Sensoren messen die Beschleunigung jeder der beiden Massen.



4

Da die Gravitation an jeder Stelle etwas unterschiedlich ist, wirkt auf jede der Probmassen eine andere Kraft, sie werden deshalb ganz minimal in unterschiedliche Richtungen bewegt. Dies resultiert letztlich in einer winzigen Bewegung der Massen entlang ihrer Verbindungsachse. Für die beiden anderen Achsen funktioniert das analog.





- Kalter und salziger Tiefstrom
- Warmer Flachstrom
- Golfstrom

Ozeanografen hoffen, dass sie mit den GOCE-Daten die großen Meeresströmungen sehr viel genauer berechnen können als bisher. Denn diese sind sowohl von der Erdrotation als auch von den Schwereverhältnissen auf der Erde abhängig

Grafik: edmundsepp

sie zusammen mit vielen anderen auf ihren Sommerurlaub verzichten und sich um ihr „Baby“ GOCE kümmern mussten; erst im September war der Schaden behoben.

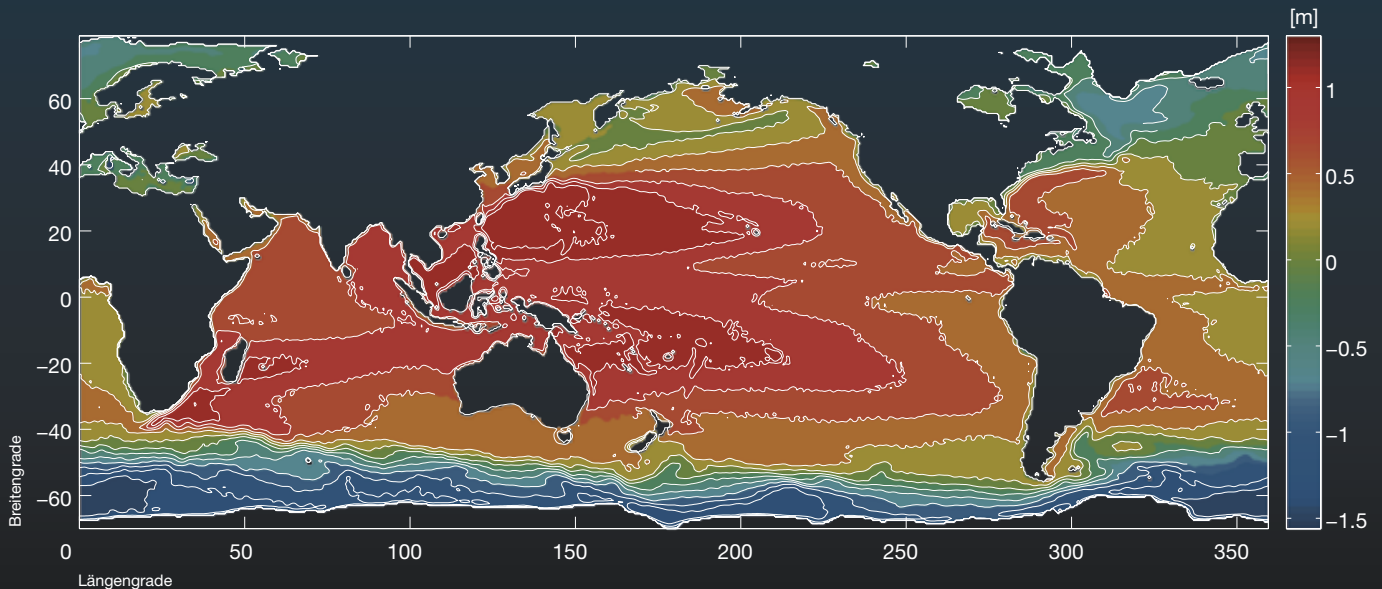
Keine Schlafphasen

Abgesehen von diesen Ausfällen arbeitet GOCE jedoch besser als erwartet, selbst die vorher eingeplanten „Schlafphasen“ waren nicht nötig. Nach der Einschalt- und Eichphase, die bis September 2009 dauerte, nahmen die Messgeräte ihren Betrieb auf, und seither sind die Wissenschaftler mit der Auswertung der gelieferten Daten beschäftigt und damit, daraus das Gravitationsfeld der Erde zu rekonstruieren. Das ist ein äußerst anspruchsvolles Unterfangen: „Es ist im Prinzip die Lösung eines großen Gleichungssystems“, schildert Roland Pail das Vorgehen. „Wir versuchen, das Geoid durch ein mathematisches Modell zu beschreiben, das 50.000 bis 60.000 Parameter hat. Wir haben etwa 100 Millionen Beobachtungsdaten in einem halben Jahr. Daraus berechnen wir diese Parameter. Wir lösen die-

se Aufgabe zum Teil mit Clustersystemen und paralleler Prozessierung, also mit eigens dafür zugeschnittenen Computern.“ Außerdem sind etliche Kunstgriffe der Mathematik und eine Vielzahl speziell entwickelter Software-Programme nötig, um die einzelnen Effekte, die auf die Messgeräte wirken, zu identifizieren und deren Beiträge voneinander zu trennen.

Strömungen im Ozean

Forschergruppen auf der ganzen Welt warten schon auf die Ergebnisse. Da sind zum einen die Ozeanografen, die sich für die großen Meeresströmungen interessieren. Diese sind sowohl von der Erdrotation als auch von den Schwereverhältnissen abhängig. „Die große Badewanne Ozean stellt sich im Idealfall so ein wie das Geoid“, erläutert der wissenschaftliche Projektleiter Reiner Rummel. Idealfall heißt hier, dass man sich Wind und Wellen wegdenkt. In der Realität aber zeigen die Ozeane Abweichungen vom Geoid. Dieser Zustand gibt im Wesentlichen Ozeanströmungen wieder, also Trans-



Grafik: eichundsepp nach TUM

Die Auslenkung der tatsächlichen Meeresoberfläche gegenüber dem GOCE-Geoid (in Metern). Man erkennt im Nordatlantik das Golfstromsystem und am Südpol den sehr starken Zirkumpolarstrom, der sich dort ungehindert von Kontinenten um die Erde bewegen kann

porte von großen Wassermassen durch die Weltmeere. Auf diese Weise können die Ozeanografen Strömungen ableiten. Daraus ergeben sich wesentliche Inputs, um langfristige Klimavorhersagen zu erstellen, denn beispielsweise der Golfstrom befördert ständig warmes Wasser nach Europa. Ihm ist zu verdanken, dass das Küstenwasser Europas etwa vier Grad Celsius wärmer ist als das Wasser in Gebieten gleichen Breitengrades im Nordpazifik. „Solche Fragen kann man natürlich nur untersuchen, wenn man das Geoid genau kennt“, sagt Rummel. „Wir messen also den wirklichen Ozean mit einem anderen Satellitenverfahren und parallel dazu das Geoid mit GOCE auf zwei Zentimeter genau in der Höhe. Dann nehmen wir die Differenz. Es ist das erste Mal, dass man global, also nicht aus numerischen Modellen, Ozeanzirkulationen erfassen kann. Das ist es, was die Ozeanografen von uns wollen.“

Die anderen Hauptabnehmer der GOCE-Daten sind neben den Geodäten die Geophysiker, die sich für die Massenverteilung und die Prozesse im Inneren der

Erde interessieren. So eröffnet GOCE sozusagen einen Blick in den Bauch der Erde. Denn dort, bereits wenige Hundert Kilometer unter der Erdkruste, geht es recht dynamisch zu, wenn auch die Prozesse nach unseren Zeitmaßstäben sehr langsam ablaufen. Aber wenn man das Gravitationsfeld und seine Anomalien kennt, ergeben sich daraus wichtige Beiträge zum Verständnis von Gebirgsbildung, Plattentektonik, Massengleichgewicht und Konvektion im Erdmantel bis hin zu Erkenntnissen über die Erdbebenentstehung.

Ursprünglich sollte die GOCE-Mission im April 2011 beendet sein. Nun aber, seit sich zeigt, dass die Genauigkeit der Schwerefeldmodelle mit jedem Umlauf besser wird, wollen die beteiligten Forscher gern eine Verlängerung der Mission erreichen, zunächst bis 2012, vielleicht sogar bis 2014. Aber irgendwann ist der Treibstoff des Ionentriebwerks aufgebraucht, und GOCE wird den Weg aller Satelliten gehen: Er wird sich der Erde immer weiter nähern und schließlich in der Atmosphäre verglühen.

Brigitte Röthlein